آشکارسازهای نوری مادون قرمز در ساختارهای چاه کوانتومی دوگانه

بهاری ، علی[۱] ؛ پیمانی ، فاطمه[۲] ؛ بیرانوند ، لیلا[۳]

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

[۲] گروه فیزیک، دانشگاه لرستان، خرم آباد

[۳] گروه فیزیک، دانشگاه لرستان، خرم آباد

چکیده

در این مقاله یک آشکارساز نوری مادون قرمز در ساختارهای چاه کوانتومی دوگانه مبتنی بر گذارهای درون باندی مطالعه شده است. این گذارها درون چاه های پتانسیل که از رشد متناوب دو ماده با ثابت شبکه ای تقریباً مشابه به وجود آمده اند، اتفاق می افتد. با استفاده از حل معادله شرودینگر به روش تفاضل متناهی، ویژه مقادیر و ویژه توابع مربوط به ساختار چاه کوانتومی دوگانه AlGaAs/GaAs/AlGaAs/ insulator / AlGaAs/GaAs/AlGaAs محاسبه و سپس قدرت نوسان کنندگی و ضریب جذب کوانتومی به دست آمد. بهینه سازی عناصر تشکیل دهنده آشکارساز اعم از محیط فعال آشکارساز و محیط های مجاور آن به منظور افزایش ضریب جذب کوانتومی آشکارساز صورت گرفت. در این مقاله وابستگی ضریب جذب کوانتومی به پهنای چاه های کوانتومی و ارتفاع سد برای بهبود عملکرد آشکارساز مورد بررسی قرار گرفت.

Infrared Photodetectors In Double Quantum Well Structures

Bahari, Ali[1]; Peymani, Fatemeh[2] ; Beiranvand, Leila[3]

[1] *Department of Physics, University of Lorestan, Khorramabad, Iran*
[2] *Department of Physics, Lorestan University, Khorramabad*
[3] *Department of Physics, Lorestan University, Khorramabad*

Abstract

In this article, a infrared photodetector in double quantum well structures based on intersubband transitions was studied. These transitions occur inside potential wells which have been created by the intermittent growth of two materials with an almostsimilar network invariant. Using the solving the Schrödinger equation with finite difference method, the Eigenvaluse and Eigenfunctions of AlGaAs/GaAs/AlGaAs/ insulator / AlGaAs/GaAs/AlGaAs double quantum well structure were calculated and then oscillation strength and quantum absorption coefficient were obtained. The constituent elements of the detector including its active region and its neighboring regions areas are optimized in order to increase quantum absorption coefficient and responsivity of the detector. In this article, the dependence of quantum absorption coefficient on the wells width of quantum and barrier height were examined in order to improve the performance of the detector.

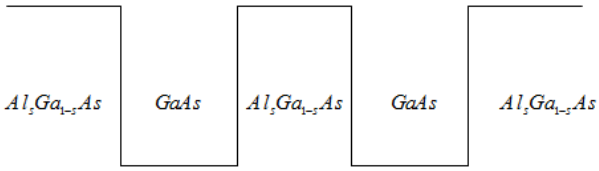
PACS No . 63.20

مقدمه

درنگاهی به چند صد سال اخیر، می توان پی برد که اشعه مادون قرمز تا ۲۰۰ سال پیش که آزمایش هرشل با حرارت سنج گزارش شد، شناخته شده نبوده است. اشعه مادون قرمز بخشی از طیف الکترومغناطیسی است که اجسام، قسمت عمده انرژی خود را به این شکل گسیل می کنند. بنابراین برای مشاهده اشیاء و فعالیت های مادی بدون انعکاس نور، تشعشعات مادون قرمز یکی از مهم ترین طیف هایی است که باید مورد مطالعه قرار گیرد. آشکارساز وسیله ای است که یک نوع از سیگنال را به نوع دیگری تبدیل می کند.انواع مختلفی از سیگنال ها می توانند وارد آشکارساز شوند که می توانند به صورت قابل اندازه گیری همانند ولتاژ و یا جریان الکتریکی خارج شوند. اهمیت اساسی این آشکارسازها در آشکارسازی طیفی از نور است که بیشتر اجسام از خود تابش می کنند که در طیف غیر مرئی قرار دارد. آشکارسازهای مادون قرمز چاه کوانتومی براساس گذارهای درون باندی، در داخل یکی از باندها مثل باند ظرفیت یا باند رسانش عمل می کنند.آشکارسازهای مادون قرمز چاه کوانتومی که از مواد GaAs/AlGaAs استفاده می کنند به دو دلیل محبوبیت بیشتری دارند.اول اینکه تکنولوژی رشد لایه های GaAs/AlGaAs و همچنین تکنولوژی ساخت ادوات نیمه هادی از مواد GaAs توسعه یافته است،دوم بدین علت که با تغییر دادن پهنای چاه های پتانسیل و ارتفاع سد می توان به آسانی طول موج آشکارسازی این آشکارسازها را تغییر داد. در این مطالعه از حل معادله شرودینگر به روش تفاضل متناهی برای بدست آمدن پارامترهای مربوطه استفاده شده است [۱].

مدلسازی تئوری

ساختار مورد نظر برای این آشکارساز، شامل چاه های کوانتومی GaAs با سدهای AlGaAs می باشد. نمایش هندسی ساختار چاه کوانتومی دوگانه به صورت شکل ۱ آورده شده است.



شکل۱ : پروفایل باندی چاه کوانتومی دوگانه متقارن

برای محاسبه ضریب جذب کوانتومی این ساختار، ابعاد ناحیه فعال (چاه های کوانتومی در آشکارساز) ومحیط های مجاور آن (سد کوانتومی) را می توان با تغییر عرض چاه ها و ارتفاع سد به گونه ای تغییر داد که طول موج مناسب برای گذارهای درون باندی تنظیم شود. در ساختار آشکار ساز، تابش مادون قرمز فرودی، الکترون ها را از حالت پایه E_1 به حالت برانگیخته E_2 منتقل می کند. در این مطالعه، با حل معادله شرودینگر برای یک ذره در چاه کوانتومی دوگانه به روش تفاضل متناهی ویژه توابع و ویژه مقادیر مربوط به ساختار موردنظر بدست آمد و سپس قدرت نوسان کنندگی برای گذارهای درون باندی مقید به مقید محاسبه و از طریق آن ضریب جذب کوانتومی بدست آمد.معادله ی شرودینگر برای یک ذره در چاه کوانتومی بصورت زیر نوشته می شود :

$$\frac{-\hbar^2}{2}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{m(x)}\frac{\partial \psi}{\partial x}\right)+V(x)\psi = E\psi \qquad (۱)$$

که m(x) جرم مؤثر وابسته به مکان ، V(x) هر پتانسیلی چه ثابت و چه غیر ثابت را شامل می شود. دو ساختار چاه کوانتومی دوگانه متقارن و نامتقارن برای محیط فعال آشکارساز در نظر گرفته شد و پس از حل معادله شرودینگر به روش تفاضل متناهی برای هر دو ساختار و محاسبه ضریب جذب کوانتومی ، ساختار مناسب برای محیط فعال آشکارساز انتخاب شد.

نتایج محاسبات عددی و بحث روی نتایج

با استفاده از توابع موج و ویژه مقادیر به دست آمده از حل معادله شرودینگر، قدرت نوسان کنندگی در چاه کوانتومی دوگانه برای هر دو تراز مقید به صورت زیر محاسبه شد :

$$f_{12} = \frac{2m^*\omega}{\hbar}\left|\langle\psi_2|z|\psi_1\rangle\right|^2 \qquad (۲)$$

پس از بدست آوردن قدرت نوسان کنندگی، ضریب جذب آشکارسازهای مادون قرمز در ساختارهای چاه کوانتومی دوگانه به صورت زیر محاسبه شد :

(۳)

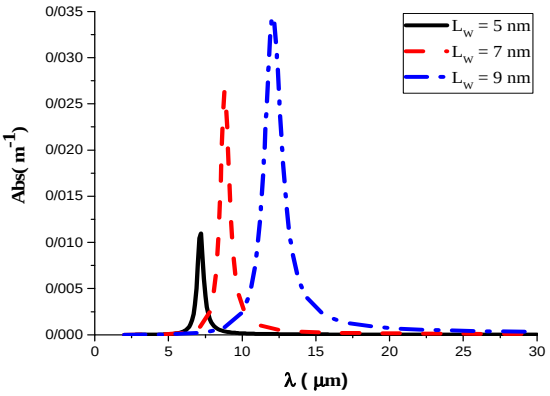
$$\alpha = \frac{e^2 h}{4\varepsilon_0 n_r m^* c} \frac{f_{12}}{\pi} n_{2D} \frac{\Delta E}{(\Delta E)^2 + (E_f - E_i - \hbar\omega)^2}$$

در رابطه (۳) ، n_{2D} چگالی حامل ها در چاه های کوانتومی و ΔE نیم پهنای مربوط به ترازهای انرژی و $\hbar\omega$ انرژی فوتون فرودی است [۲] .به این ترتیب ضریب جذب برای چاه کوانتومی دوگانه متقارن و نامتقارن در محیط فعال آشکارساز محاسبه می شود.برای افزایش جذب کوانتومی و بهبود عملکرد آشکارساز، اثر افزایش طول چاه های کوانتومی و ارتفاع سد برای هر دو ساختار چاه کوانتومی متقارن و نامتقارن دوگانه مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد استفاده در این محاسبات به این صورت هستند که در آن m_0، جرم سکون الکترون می باشد[۳-۴] :

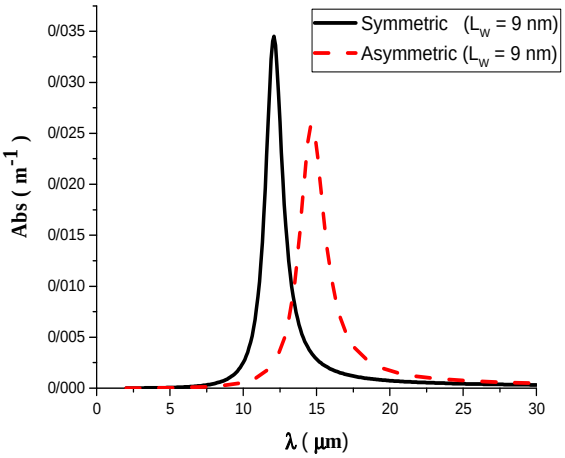
$$m^*_{GaAs} = (0.067)m_0$$

$$m^*_{Al_sGa_{1-s}As} = (0.083s + 0.067)m_0$$

در شکل ۲، جذب کوانتومی به صورت تابعی از طول موج برای مقادیر مختلف طول چاه های کوانتومی متقارن رسم شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش طول چاه کوانتومی دوگانه، تعداد انرژی های مقید بیشتر شده و ترازهای انرژی به هم نزدیک می شوند. همین عامل سبب می شود که جذب فوتون ها توسط الکترون ها بیشتر شده و در نتیجه ضریب جذب کوانتومی افزایش می یابد و مقدار پیک با افزایش طول چاههای کوانتومی برای جذب کوانتومی بیشتر می شود. برای چاه کوانتومی دوگانه نامتقارن نیز ، روندی همانند شکل ۲ مشاهده می شود ولی افزایش جذب کوانتومی برای چاه دوگانه متقارن بیشتر از چاه دوگانه نامتقارن می باشد زیرا در چاه های نامتقارن اختلاف انرژی نسبت به چاه های متقارن کمتر است و طبق قانون طلایی فرمی ، چون نرخ انتقال از یک تراز به تراز دیگر با انرژی رابطه مستقیم و با زمان انتقال رابطه عکس دارد، از اینرو برای چاه های متقارن نسبت به نامتقارن الکترون ها سریع تر جذب می شوند و جذب فوتون ها برای چاههای نامتقارن نسبت به چاههای متقارن کمتر است. در شکل ۳ مقایسه ای بین ماکزیمم مقدار جذب کوانتومی برای چاه کوانتومی دوگانه متقارن و نامتقارن در ماکزیمم مقدار طول چاه های کوانتومی صورت گرفت که بنابر دلایل گفته شده جذب کوانتومی برای چاه های متقارن بیشتر از چاه های نامتقارن است.



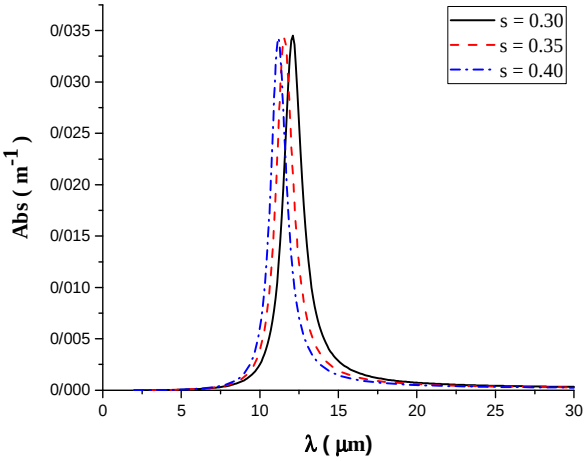
شکل۲ : اثر افزایش طول چاه کوانتومی دوگانه متقارن برای جذب کوانتومی



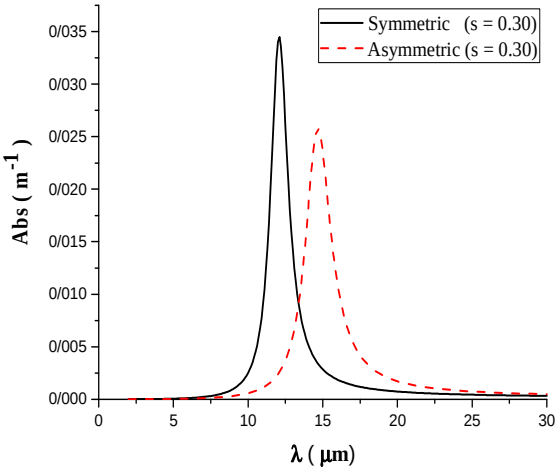
شکل۳ : مقایسه جذب کوانتومی برای چاه کوانتومی دوگانه متقارن و نامتقارن در ماکزیمم مقدار طول چاه ها

در شکل ۴، جذب کوانتومی به صورت تابعی از طول موج برای مقادیر مختلف درصد نسبی آلومینیوم برای چاه های کوانتومی متقارن و نامتقارن رسم شده است. از این شکل دریافت می شود که با کاهش نسبی آلومینیوم ترازهای انرژی به یکدیگر نزدیکتر می شوند، همین عامل سبب می شود جذب فوتون ها توسط الکترون ها بیشتر شود و در نتیجه ضریب جذب کوانتومی افزایش می یابد و مقدار پیک با کاهش نسبی آلومینیوم برای جذب بیشتر می شود. برای چاه کوانتومی دوگانه نامتقارن نیز ، روندی همانند شکل ۴

مشاهده می شود ولی افزایش جذب کوانتومی برای چاه دوگانه متقارن بیشتر از چاه دوگانه نامتقارن می باشد زیرا در چاه های نامتقارن اختلاف انرژی نسبت به چاه های متقارن کمتر است و طبق قانون طلایی فرمی ، چون نرخ انتقال از یک تراز به تراز دیگر با انرژی رابطه مستقیم و با زمان انتقال رابطه عکس دارد، از اینرو برای چاه های متقارن نسبت به نامتقارن الکترون ها سریع تر جذب می شوند و جذب فوتون ها برای چاههای نامتقارن نسبت به چاههای متقارن کمتر است. در شکل ۵ ، مقایسه ای بین ماکزیمم مقدار جذب کوانتومی برای چاه کوانتومی دوگانه متقارن و نامتقارن در کمترین مقدار درصد نسبی آلومینیوم صورت گرفت که بنابر دلایل گفته شده جذب کوانتومی برای چاه های متقارن بیشتر از چاه های نامتقارن است.



شکل۴ : اثر افزایش درصد نسبی آلومینیوم چاه کوانتومی دوگانه متقارن برای جذب کوانتومی



شکل۵ : مقایسه جذب کوانتومی برای چاه کوانتومی دوگانه متقارن و نامتقارن در کمترین مقدار درصد نسبی آلومینیوم

نتیجه گیری

در این تحقیق چاه کوانتومی دوگانه متقارن و نامتقارن به عنوان محیط فعال آشکارساز درنظرگرفته شد، محاسبات عددی نشان می دهد که با افزایش طول چاههای کوانتومی تعداد انرژی های مقید بیشتر شده و ترازهای انرژی به یکدیگر نزدیک می شوند، همین عامل سبب می شود که جذب فوتون ها توسط الکترون ها بیشتر شود و در نتیجه ضریب جذب کوانتومی افزایش می یابد و مقدار پیک با افزایش طول چاههای کوانتومی برای جذب کوانتومی بیشتر می شود و با کاهش نسبی آلومینیوم ترازهای انرژی به یکدیگر نزدیکتر می شوند، همین عامل سبب می شود جذب فوتون ها توسط الکترون ها بیشتر شود و در نتیجه ضریب جذب کوانتومی افزایش می یابد و مقدار پیک با کاهش نسبی آلومینیوم برای جذب بیشتر می شود.این وضعیت برای هر دو چاه کوانتومی دوگانه متقارن و نامتقارن نیز برقرار است.

مرجع ها

[1] W. Herschel, *Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the Sun*, Philosophical Transaction on Royal Society of London **90** (1800) 284.
[2] Capasso, F., Sirtori, C., and Cho, A. Y. (1994). IEEE J. Quantum Electron. **30**, 1313.
[3] B. F. Levine, J. Appl. Phys. **74**, R1 (1993).
[4] Lengyel, G., Jelley, K. W., & Engelmann, R. W. (1990). a semi-empirical model for electroabsorption in GaAs/AlGaAs multiple quantum well modulator structures. Quantum Electronics, IEEE Journal of, **26**(2), 296-304.